

КАСКАДНАЯ ПЕЧЬ В ТЕХНОЛОГИИ ЦЕМЕНТА

Крючкова К.В., Фетисов Б.А.

УрФУ

E-mail: fba@k66.ru

Теплотехнологические процессы, протекающие в печах цементной технологии, характеризуются явно выраженной ступенчатостью [1]. При этом термодинамика процесса на каждой ступени определяется условием [2]:

$$\Delta G < 0. \quad (1)$$

Характерной особенностью ступенчатых теплофизических процессов в печах обжига является наличие определенного порога температуры, соответствующей началу протекания процесса. В случае равновесного изобарного процесса этот температурный уровень определяется условием:

$$\Delta G_{p,T} = 0. \quad (2)$$

Энергия Гиббса химической реакции ΔG определяется свойствами исходных и конечных веществ реакции и температурой. Для стандартного состояния вещества:

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0, \quad (3)$$

и условие (1) может быть заменено условием:

$$T' > T, \quad (4)$$

где температура, соответствующая химическому равновесию, T определяется из уравнения (3) при условии равенства правой части нулю, T' - температура процесса.

Условие (1) определяет ступенчатый характер энергопотребления, присущий многим физико-химическим процессам, протекающим в печах при тепловой обработке сырья, особенно при обработке тонкодисперсных материалов. Однако реальная возможность протекания того или иного процесса определяется не только термодинамикой, но и кинетикой процесса [2].

Связь между энергией Гиббса химической реакции ΔG и стандартной энергией Гиббса химической реакции ΔG^0 определяется изотермой Вант-Гоффа:

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln k_p, \quad (5)$$

откуда следует выражение для константы равновесия k_p ($\Delta G=0$):

$$k_p = \exp(-\Delta G^0 / RT). \quad (6)$$

Вторым условием является обеспечение необходимой скорости протекания физико-химического процесса. В соответствии с принципом Ле Шателье, гетерогенное химическое равновесие (как и гомогенное) смещается под действием температуры и концентрации (парциального давления) в сторону, противоположную направлению внешнего воздействия. Из двух факторов (температура и давление) для интенсификации эндотермических процессов декарбонизации и дегидратации предпочтение, очевидно, должно быть отдано второму, так как повышение температурного уровня процесса, как правило, нежелательно по технологическим соображениям, поскольку приводит к ухудшению технических свойств получаемого продукта.

Важным условием снижения энергозатрат является повышение удельных съёмов или удельных производительностей за счет уменьшения времени пребывания материала в печи, что определяется двумя факторами: интенсивностью теплообмена и скоростью химических реакций. В общем случае, по указанным выше причинам, предпочтение должно быть отдано факторам интенсификации, не связанным с увеличением температурного уровня процесса, как известно, способствующего интенсификации обоих процессов.

Константа скорости реакции связана с температурой (T) и энергией активации E_a уравнением Аррениуса:

$$k = k_0 \cdot \exp(-E_a / R \cdot T) \quad (7)$$

Влияние энергии активации на скорость реакции связано с особенностью протекания реакции через промежуточные состояния, изменяющие характер внутримолекулярных взаимодействий и требующих больших значений энтальпии, чем следует из условия (2).

Реакции дегидратации и декарбонизации являются гетерогенными: зона реакции (диффузионная зона) перемещается с внешней границы вглубь частицы по мере ее прогрева. Поэтому на скорость процесса, помимо константы скорости реакции, оказывают влияние форма и удельная поверхность частиц, теплопроводность твердой фазы и интенсивность внешнего теплового потока, скорость отвода газообразных продуктов реакции из реакционной (диффузионной) зоны. Любой из перечисленных механизмов в тех или иных условиях может лимитировать общую скорость процесса.

Важным обстоятельством является также известный факт замедления процесса ступенчатого химического превращения при одновременном протекании нескольких ступеней, имеющем место при достаточно высоком температурном уровне, при этом общая скорость процесса оказывается ниже скорости самой медленной ступени [2]. В случае ступенчатого процесса дегидратации этот факт может быть легко обоснован влиянием на скорость реакции увеличивающейся

концентрации паров воды за счет совместного протекания последовательных ступеней в одной реакционной зоне.

Очевидно, что достаточно широко распространенная в технологических печах ступенчатость теплотребления технологическим материалом должна учитываться при организации теплотехнологического процесса и выборе конструкции каскадной печи для его осуществления. Основное требование к конструкции каскадной печи – обеспечение возможности локального управления ступенчатым теплотехнологическим процессом с целью создания оптимальных условий для достижения максимально возможной его завершенности на каждой технологической ступени, что практически невозможно без разделения рабочего пространства печи на отдельные в определенной мере пространственно изолированные технологические зоны.

Как показал опыт эксплуатации на Уральском алюминиевом заводе построенной в 2004 году первой каскадной опытно-промышленной циклонной установки ОПЦУ-500, такой подход к конструированию печи позволил в 1,5 раза снизить уровень удельного расхода топлива (до 96...98 кг у.т./т глинозема); получить технологический продукт с содержанием б – глинозема от 3 до 6 % при $\Delta m_{\text{пот}} < 1$ %, то есть с техническими свойствами, ранее недоступными отечественной промышленности [3].

Разрабатываемая технологическая схема получения цементного клинкера, основанная на использовании каскадной печи, включает систему подготовки шлама по мокрому способу, удаление избыточной влаги механическим путем, досушку сырья в трубе-сушиле (первый каскад печи), подогрев в циклонных теплообменниках, декарбонизацию, дополнительную ступень подогрева в циклонном теплообменнике, спекание в короткой вращающейся печи при минимально необходимой температуре на каждом каскаде; охлаждение клинкера.

Библиографический список

1. Стромберг А.Г., Семченко Д.П. Физическая химия. М.: Высш. шк., 2003. 527 с.
2. Коровин Н.В. Общая химия. 3-е изд., испр. М.: Высш. шк., 2002. 558 с.
3. Фетисов Б.А. Каскадные печи // Творческое наследие Б.И.Китаева: Труды Международной науч.-практ. конф. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. С. 480–485.